

Анализ результатов натуральных испытаний сосредоточенных заземлителей при импульсных токах

АННЕНКОВ В.З.

Защищенность ВЛ от молнии в значительной степени определяется значениями импульсных сопротивлений заземлителей опор, а не значениями сопротивлений при промышленной частоте, которые указаны в ПУЭ. До настоящего времени расчетные значения импульсных сопротивлений заземлителей приходилось сравнивать с экспериментальными при токах примерно 20 кА, в то время как расчетный ток молнии составляет 100 кА. Это было бы уместно, если бы характеристики заземлителей при токах испытаний были бы аналогичны характеристикам при токах молнии. Разработан метод расчёта стержневого заземлителя при реальных токах молнии. Расчётом установлено, что при токах молнии не только импульсное сопротивление существенно меньше, но и качественные характеристики сильно отличаются от экспериментальных. Например, при токах около 100 кА импульсное сопротивление увеличивается при росте размеров заземлителей, а не уменьшается, как при токах 20 кА.

К л ю ч е в ы е с л о в а: воздушные линии, заземлители опор, импульсные сопротивления, токи молнии

Разработанный метод расчёта стержневого заземлителя при реальных токах молнии [1, 2] дал возможность установить, что при токах молнии не только импульсное сопротивление существенно меньше, но и качественные характеристики другие, чем при проведенных испытаниях [1–3]. Например, при токах порядка 100 кА импульсное сопротивление увеличивается при увеличении размеров заземлителей, а не уменьшается, как при токах 20 кА.

В общем, результаты импульсных испытаний заземлителей показали, что с увеличением размеров заземлителей импульсное сопротивление уменьшается, как и при промышленной частоте. Однако в некоторых случаях всё же имеются отступления от этого правила. Даже при испытаниях под руководством А.Л. Вайнера [3] отмечено при увеличении длины вслед за уменьшением повышенное импульсное сопротивление.

В 1976 г. австралийскими исследователями был проведен опыт искрового разряда в землю без заземлителя. При этом было получено значение импульсного сопротивления в месте разряда, равное 13 Ом [4]. Такое относительно малое значение импульсного сопротивления противоречило существующей теории, при которой импульсное сопротивление должно увеличиваться при сокращении размеров заземлителя. В Канаде был повторен указанный опыт заземления через искровой разряд [7]. Однако в результате получен тот же результат. Наконец, в Сарове [5] и Харькове [6] были проведены

испытания стержневых заземлителей при токах, близких к реальным токам, которые рассматриваются далее.

Испытания одного трубчатого заземлителя. Схема проведения испытаний приведена в [5]. Удельное электрическое сопротивление грунта было равно 200 Ом·м. Пробивная напряжённость грунта не определялась. Стержень представлял собой отрезок трубы диаметром 5 и длиной 225 см.

Импульс тока с нарастающей крутизной имел эквивалентный фронт около 120 мкс с максимальным значением 86 кА (рис. 1). При этом плотность тока составила 12,3 А/см². На рис. 1 приведены также опытная и расчётные зависимости импульсного сопротивления от времени действия тока, а также рассчитанная зависимость от тока эквивалентного по сопротивлению радиуса зоны искрообразования.

Из рис. 1 (кривая 2) видно, что импульсное сопротивление стержневого заземлителя при протекании испытательного тока уменьшается с 73 до 5 Ом. При этом импульсный коэффициент 0,07 – того же порядка, как и в [3]. После максимума тока, на его спаде, опытное импульсное сопротивление сохраняется неизменным.

В связи с тем, что электрические характеристики грунта в основном не определялись, были использованы формулы импульсного сопротивления стержневого заземлителя в грунтах с линейными вольт-амперными характеристиками.

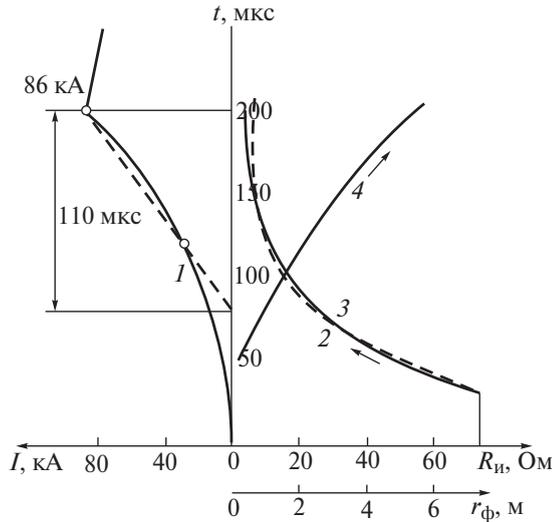


Рис. 1. Сравнение результатов натуральных сетевых испытаний стержневого заземлителя с результатами расчета: 1 – ток испытаний; 2 – зависимость импульсного сопротивления от времени (опыт); 3 – то же (расчет); 4 – зависимость фиктивного радиуса зоны искрообразования от времени

При этом импульсное сопротивление рассчитывается по формуле

$$R_{и} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r_{\phi}}{L}\right)^2}}{\frac{r_{\phi}}{L}}, \quad (1)$$

где

$$r_{\phi} = r_{\phi m} (\sqrt[3]{1/2 + M} + \sqrt[3]{1/2 - M}). \quad (2)$$

Здесь

$$M = \sqrt{1/4 + 1/27 \left(\frac{L}{r_{\phi m}}\right)^6} - \quad (3)$$

расчётное значение;

$$r_{\phi m} = \sqrt[3]{\frac{1}{r_0} \left(\frac{\rho I}{2\pi E_{пр}}\right)^6} - \quad (4)$$

значение, совпадающее со значением радиуса зоны искрообразования полушарового заземлителя.

Из рис. 1 видно, что расчётная кривая 3 практически совпадает с опытной 2.

В связи с тем, что пробивная прочность грунта не определялась, для расчёта использовалось значение, определённое Бергером [5] для песчаного грунта – 12 кВ/см. Зависимость импульсного сопротивления стержневого заземлителя от пробивной напряжённости грунта при токе 100 кА приведена далее:

Пробивная напряженность грунта, кВ/см	Расчетное импульсное сопротивление, Ом
5	3,0
10	4,8
12	5,5
14	6,0
20	7,9

Значение 20 кВ/см получено для плохо проводящего грунта из песчаного карьера [4]; значения от 5 до 14 кВ/см, получены в [7] для различных грунтов, в том числе для глины, с помощью сложного прибора для снятия характеристик, который имел экранное кольцо.

Как видно из рис. 1 (кривая 4) при токе 86 кА диаметр зоны искрообразования составил 11 м.

Разделение процессов в заземлителе на искрообразование с сопротивлением R_i и растекания с сопротивлением R_0 . Нелинейность вольт-амперной характеристики грунта, а также излучение не учитываются. Ток при испытаниях равен сумме токов проводимости и искрообразования, поэтому проводимость, вызванная только искрообразованием, равна:

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_{и}} - \frac{1}{R_0}, \quad (5)$$

где $R_{и}$ – импульсное сопротивление стержня во время опыта; R_0 – сопротивление при небольшом токе промышленной частоты.

Напряжение на заземлителе

$$U = R_{и} I; \quad (6)$$

Ток, вызванный только искрообразованием в земле,

$$I_i = U / R_i \quad (7)$$

и плотность тока искрообразования

$$D_i = I_i / S, \quad (8)$$

где S – площадь боковой поверхности стержня.

Результаты расчёта по (5)–(8) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Ток испытаний I, кА	Плотность тока, кА/см ²		
	D_0	D_i	$D_{и}$
2	0,40	0,10	0,56
5	0,73	0,73	1,40
10	1,25	1,63	2,80
20	1,30	4,00	5,60
43	1,66	10,10	12,00
86	1,96	22,40	24,00

По данным табл. 1 на рис. 2 построены кривые зависимостей указанных плотностей токов от тока

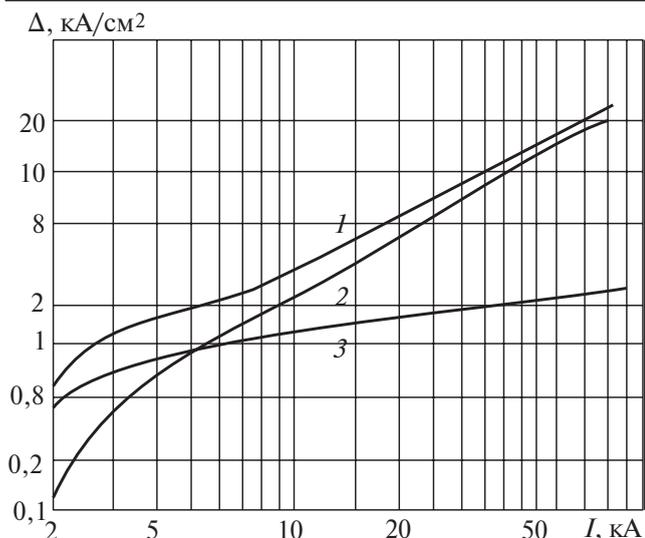


Рис. 2. Пересечение кривой плотности тока искрообразования кривую тока проводимости: 1 – суммарная плотность тока (испытаний); 2 – плотность тока искрообразования; 3 – то же проводимости

испытаний. До плотности тока 6,3 кА/см плотность тока проводимости D_0 превышает плотность искрообразования D_i . Наоборот, после указанного значения плотность тока искрообразования существенно больше тока проводимости. Например, при токе 86 кА искрообразование составляет 1000% тока проводимости.

Импульсное сопротивление нескольких заземлителей, расположенных по одной линии. В отводе тока с опоры ВЛ могут участвовать один или несколько естественных или искусственных заземлителей. При этом возникает задача определения коэффициента использования заземлителей при большом заданном токе.

Кроме того, значения напряжённости между стержнями вычитаются, а вне стержней – суммируются. При этом диаметр зоны искрообразования каждого из электродов не изменяется, а расстояние между центрами зон искрообразования увеличивается и равно [8]:

$$a_3 = \sqrt{a^2 + r_\phi^2}. \quad (9)$$

Увеличенное расстояние – результат сложения значений напряжённости – названо эквивалентным.

Смещение зон нелинейности в конструкции из m электродов, расположенных на одной линии, равно [8]:

$$a_3 = \sqrt{a^2 + r_\phi^2}, \quad (10)$$

при этом импульсное сопротивление m -го электрода равно:

$$R_{и1} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r_\phi}{L}\right)^2}}{\frac{r_\phi}{L}} + \sum_{m=1}^n \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a_m}{L}\right)^2}}{\frac{a_m}{L}} \right). \quad (11)$$

Коэффициент использования при одинаковых стекающих токах – отношение сопротивления электродов, расположенных на большом расстоянии, к сопротивлению на малом:

$$h_{и} = R_{и} / R_{и1}. \quad (12)$$

Для сопоставления с результатами испытаний [8] приняты следующие исходные данные: эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта $\rho=910$ Ом·м, длина стержня $L=3$ м, радиус $r_0=0,02$ м, расстояние между соседними стержнями $a=2,67$ м. Пробивная электрическая напряженность грунта принята равной $E_{пр} = 12$ кВ/см. Сопротивление растеканию шины, соединяющей стержни, не учитываем. При наибольшем токе испытаний 70 кА плотность тока, стекающего в землю, составила 4,7 А/см², что в 2,6 раза меньше, чем при упомянутых ранее испытаниях одного стержневого заземлителя током 86 кА. Однако представляет интерес не плотность тока, а влияние полей электродов друг на друга.

Необходимо отметить, что искрообразование зависит не непосредственно от тока, а от произведения тока на удельное сопротивление грунта. Поэтому можно пересчитать значение тока по удельному сопротивлению грунта при испытаниях:

$$I_4 = I_1(\rho_4 / \rho_1) = 70(910 / 200) = 318 \text{ кА},$$

что много больше, чем при испытаниях первого заземлителя.

Импульсное сопротивление конструкции из четырёхстержневых электродов, расположенных на одной линии, определяется по формуле (11) при $n=4$. Расчётные параметры, определённые с использованием формулы (11), приведены в табл. 2.

Таблица 2

Ток, стекающий с одного из стержней I_1 , кА	Сопротивление, Ом		Импульсный коэффициент использования системы четырех электродов $h_{и}$
	одного стержня $R_{и1,4}$	всей системы $R_{и4}$	
5,0	95,2	23,8	0,44
10,0	61,4	15,4	0,21
17,5	45,3	11,3	0,20
25,0	36,7	9,20	0,20

В табл. 2: I_1 – ток, стекающий с одного из стержней системы; $R_{и1,4}$ – сопротивление этого стержня; $R_{и4}$ – сопротивление всей системы; $h_{и}$ – импульсные коэффициенты использования системы из четырёх электродов.

Как видно из табл. 2, коэффициент использования стержня в системе очень низок, так как каждый стержень находится в поле других. Кроме того, импульсное сопротивление конструкции из четырёх стержней в несколько раз больше, чем одного стержня. При наибольшем токе 70 кА результаты расчёта и опыта совпадают. Импульсное сопротивление при 100 кА только на 20% меньше, чем при токе испытаний 70 кА.

Опытная и расчётная зависимости импульсного сопротивления от тока приведены на рис. 3, откуда видно, что расчётная кривая практически совпадает с опытной, за исключением относительно малых токов.

Расхождение можно объяснить неучётом неизвестной вольт-амперной характеристики грунта.

Несмотря на различные грунты в местах расположения первого и второго заземлителей, значения обобщённого критерия подобия

$$\Pi_4 = \frac{\rho I}{L \sqrt{r_0 L E_{пр}}}$$

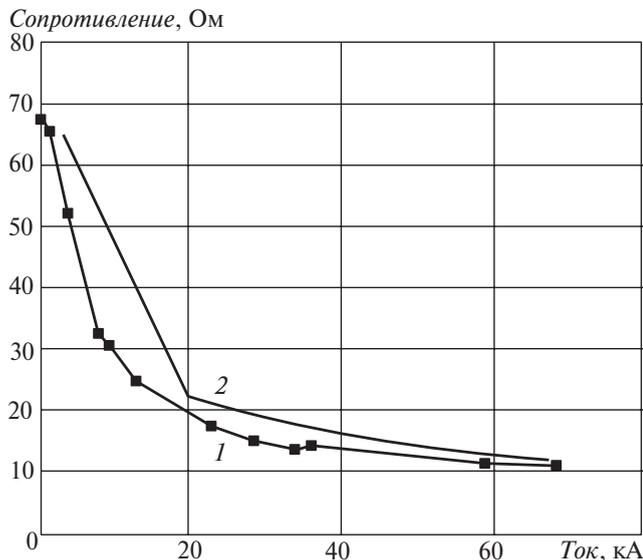


Рис. 3. Опытная (1) и расчётная (2) зависимости импульсного сопротивления от тока

у них близки друг к другу и равны, соответственно, 27 и 18. Эти значения примерно соответствуют значениям, полученным Вайнером в плохо проводящих грунтах. Из опытных данных нельзя получить зависимость импульсного сопротивления от размеров заземлителей. Чтобы экспериментально установить зависимость импульсного сопротивления заземлителя от длины при токах порядка 100 кА, необходимо провести испытания двух заземлителей существенно различной длины в одном и том же, лучше песчаном, грунте.

Вывод. Результаты разработанных методов расчёта импульсного сопротивления стержневых заземлителей практически совпадают с данными натуральных испытаний при токах, близких к расчётному току молнии. При натуральных испытаниях заземлителей необходимо определять электрические характеристики грунта в месте расположения испытываемого заземлителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анненков В.З. Метод расчёта импульсного сопротивления стержневого заземлителя в песчаном грунте. – Электричество, 1995, № 6.
2. Анненков В.З. Метод расчёта импульсного сопротивления стержневого заземлителя. – Электричество, 1997, № 8.
3. Вайнер А.Л., Потужный А.К., Фертик С.М. Исследование заземлителей в плохо проводящих грунтах. – Электричество, 1947, № 2.
4. Liew A.C., Darveniza M. Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earth. – Proc. of the IEE, 1976, vol. 121, No. 2.
5. Chisholin W.A., Janischevskiy W. Lightning surge response of ground electrodes. – IEE Tr. on Power Delivery, April 1989, vol. 4, No. 2.
6. Kravchenko A.S., Vilkov Yu.V., Selemine V.D., Telekhin V.A., Yurizhev A.S., Zolotov V.A. Study of Shark Discharge in Ground at Lightning Current Pulse Reproduction using MCG. Russian Fed. Nucl. Center. – VNIEF, Sarov: Plasma Science, 2007, ICOPS 2007.
7. Рябкова Е.Я. Импульсные характеристики заземлителей: Дис.... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1955.
8. Борисов Р.К., Коломиец Е.В., Колишко Г.М. Исследование импульсных характеристик заземляющих устройств. Сборник докладов Третьей российской конф. по заземляющим устройствам / Под ред. Ю.В. Целебровского. Новосибирск, Сибирская энергетическая академия, 2008.
9. Анненков В.З. Критерии подобия и расчёт сосредоточенных заземлителей молниезащиты. – Электричество, 1998, № 6.

[04.02.2018]

А в т о р: Анненков Виктор Захарович окончил Московский энергетический институт в 1959 г. В настоящее время пенсионер.

An Analysis of the Results from Field Tests of Lumped Grounding Electrodes under the Conditions of Surge Currents

ANNENKOV Victor Z. (Moscow, Russia) – Pensioner, Cand. Sci. (Eng.)

The extent to which an overhead power line is protected from lightning strokes depends to a considerable degree on the values of surge impedances of line support grounding conductors rather than on their impedances at the power frequency that are specified in the Electrical Installations Code (PUE). Hitherto, the results from calculations of grounding conductor surge impedances had to be compared with the results of tests carried out with currents around 20 kA, whereas the lightning stroke current design value is 100 kA. Such an approach would be valid provided that the grounding conductor parameters were similar to those under the conditions of lightning currents. A method for calculating a rod type grounding conductor parameters under the conditions of real lightning currents is developed. The calculation results have shown that the grounding conductor surge impedance is essentially lower under lightning current conditions; moreover, its qualitative characteristics differ from those obtained from the tests. For example, with currents around 100 kA, the surge impedance increases with increasing the grounding conductor sizes instead of decreasing as is the case with currents equal to 20 kA.

Key words: overhead power lines, line support grounding conductors, surge impedances, lightning currents

REFERENCES

1. Annenkov V.Z. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1995, No. 6.
2. Annenkov V.Z. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1997, No. 8.
3. Vainer A.L., Potuzhnyi A.K., Fertic S.M. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1947, No. 2.
4. Liew A.C., Darveniza M. Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earth. – Proc. of the IEE, 1976, vol. 121, No. 2.
5. Chisholin W.A., Janischevskiy W. Lightning surge response of ground electrodes. – IEE Tr. on Power Delivery, April 1989, vol. 4, No. 2.
6. Kravchenko A.S., Vilkov Yu.V., Seletin V.D., Telekhin V.A., Yurizhev A.S., Zolotov V.A. Study of Shark Discharge in Ground at Lightning Current Pulse Reproduction using MCG. Russian Fed. Nucl. Center. – VNIIEF, Sarov: Plasma Science, 2007, ICOPS 2007.
7. Ryabkova Ye.Ya. *Impul'snye kharakteristiki zazemlitelei (Impulse characteristics of grounding)*. Diss.... kand. tekhn. nauk (Diss. for the Degree of Cand. Sci. (Eng.)). Moscow Power Engineering Institute, 1955.
8. Borisov R.K., Kolomiyets Ye.V., Koliushko G.M. *Sbornik dokladov 3 Rossiiskoi konf. po zazemlyayushchim ustroystvam/Pod red. Yu.V. Tselebrovskogo (Collection of reports of the 3rd Russian conf. for grounding devices/Ed. by Yu.V. Tselebrovskii)*. Novosibirsk, Sibir' Power Engineering Academy, 2008.
9. Annenkov V.Z. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1998, No. 6.

[04.02.2018]